

УДК 621.937

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ЗАЗОРА В СОПРЯЖЕНИИ НАКАТНОЙ РОЛИК–ОСЬ НА ХАРАКТЕР ЕГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ОСНОВАНИЕМ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ ВОЗБУЖДЕНИИ СИСТЕМЫ

М. Г. КИСЕЛЕВ<sup>+</sup>, А. В. ДРОЗДОВ

УО «Белорусский национальный технический университет», пр. Независимости, 65, 220013 г. Минск, Беларусь.

*В статье приведены результаты теоретического исследования влияния величины зазора в сопряжении накатной ролик – ось виброударной акустической колебательной системы, а также уровня ее ультразвукового возбуждения на характер движения подвижного звена при его взаимодействии с жестким основанием. С помощью разработанной математической модели, используя метод припасовывания, получены временные эволюции движения звеньев виброударной системы при различных условиях их взаимодействия, на основании которых показано, что характер движения подвижного звена является неустойчивым как по отношению к величине зазора, так и к интенсивности ультразвукового возбуждения, а движение элементов акустической колебательной системы является хаотическим. Определено критическое значение зазора  $\Delta_{\text{крит}}$ , зависящее от амплитуды вынужденных ультразвуковых колебаний, при превышении которого происходит стабилизация временной эволюции подвижного звена.*

### Введение

Одним из эффективных направлений повышения производительности, точности и качества обработки поверхностей деталей методом обкатки является применение на этих операциях энергии ультразвука [1–3]. В частности, путем сообщения ультразвуковых колебаний накатному ролику в процессе шаржирования рабочих поверхностей инструментов можно существенно повысить уровень эксплуатационных показателей (режущая способность и износостойкость) формируемого на них алмазосодержащего покрытия [4–7].

Как установлено результатами предшествующих исследований [4], в основе положительного влияния ультразвука на операциях поверхностной обработки материалов лежит совокупность явлений, протекание которых обусловлено виброударным режимом контактного взаимодействия инструмента с заготовкой. Это изменение кинематики и динамики их относительного скольжения или качения, снижение сил контактного трения, облегчение условий протекания контактных пластических деформаций, снижение уровня колебаний и вибраций, действующих в системе СПИД (станок – приспособление – инструмент – деталь). Поэтому повышение эффективности применения

ультразвука и расширение области его технологического использования, в первую очередь, связано с изучением вопросов, отражающих влияние способа установки инструмента в акустической колебательной системе, условий ее нагружения и возбуждения на характер и параметры режима виброударного взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью.

Цель работы – теоретическое исследование характера и параметров виброударного режима взаимодействия накатного ролика, установленного на оси вращения с зазором, с неподвижным основанием при сообщении ему ультразвуковых колебаний.

### Расчетная схема, примененная в исследованиях

За основу была принята технологическая схема шаржирования поверхности накатным роликом при сообщении ему ультразвуковых колебаний, представленная на рис. 1.

Акустическая колебательная система состоит из ультразвукового преобразователя продольных колебаний 1, соединенного с полуволновым коническим концентратором 2. В его узловом сечении выполнен фланец, к которому прикреплен корпус 3. Последний установлен на шариковых направ-

<sup>+</sup> Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: dav7@tut.by.

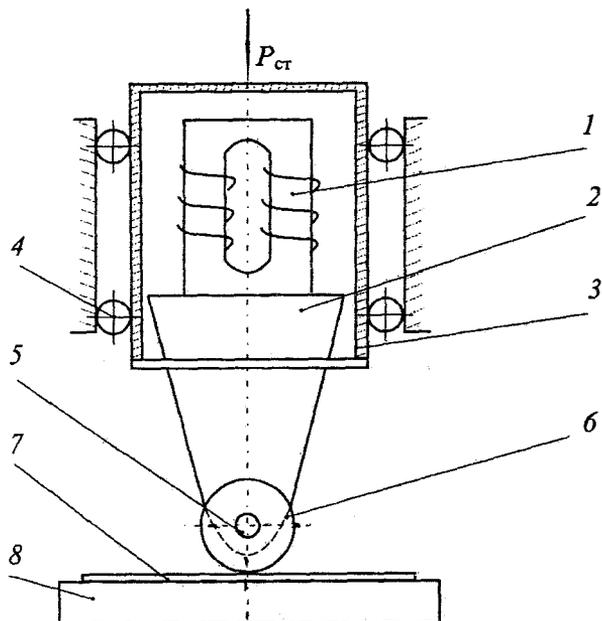


Рис. 1. Схема акустической колебательной системы технологического назначения для шаржирования распиловочных дисков накатным роликом с ультразвуком: 1 – ультразвуковой преобразователь; 2 – полуволновой конический концентратор; 3 – корпус; 4 – шариковые направляющие; 5 – ось; 6 – накатный ролик; 7 – распиловочный диск; 8 – основание

ляющих 4, обеспечивающих плавное и с минимальным трением перемещение всей акустической системы в вертикальном направлении. Вблизи выходного торца концентратора жестко закреплена ось 5, которая служит опорой скольжения для накатного ролика 6. Последний под действием статической нагрузки  $P_{ст}$  прижимается к обрабатываемой (шаржируемой) поверхности 7, закрепленной на подвижном основании 8.

В предшествующих исследованиях [8], посвященных теоретическому описанию виброударного режима качения ролика, было сделано допущение о том, что ролик на оси установлен по скользящей посадке с нулевым зазором, что позволило рассматривать его жестко закрепленным на концентраторе ультразвукового излучателя и колеблющимся благодаря этому, с частотой возбуждения последнего, что характерно для акустических систем замкнутого типа.

На практике между сопрягаемыми поверхностями вращающегося ролика и осью всегда имеется зазор, благодаря которому ролик следует рассматривать как свободно установленный на выходном торце концентратора ультразвукового излучателя, а такая акустическая система относится к системам разомкнутого типа. Очевидно, что наличие зазора в указанном сопряжении и его величина будут влиять на характер и параметры виброударного взаимодействия ролика с обрабатываемой поверхностью, что свойственно акустическим колебательным системам такого типа, т.е. со свободно установленным инструментом [4].

Для теоретического исследования этих вопросов применительно к технологической схеме

шаржирования (рис. 1) воспользуемся расчетной схемой, представленной на рис. 2.

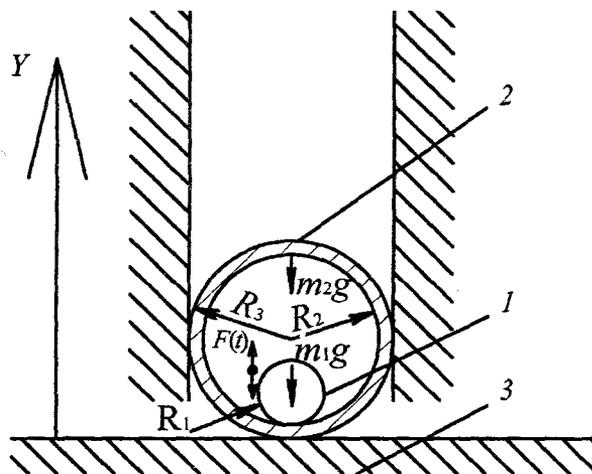


Рис. 2. Расчетная схема, примененная в исследованиях

В ней ось акустической колебательной системы заменена твердым телом 1 сферической формы радиусом  $R_1$  и массой  $m_1$ , которая расположена внутри накатного инструмента, представленного кольцом 2 с размерами внутреннего и внешнего радиусов  $R_2$  и  $R_3$ , а также массой  $m_2$ . К обоим телам модели прикладывается сила тяжести, равная соответственно  $m_1g$  и  $m_2g$ . В результате ее действия кольцо 2 давит на твердое основание 3, представляющее в модели поверхность шаржируемого инструмента, а сфера 1 покоится внутри кольца 2, как показано на рис. 2. Шариковые направляющие 4 (рис. 1) в модели заменены вертикальными стенками, допускающими только вертикальное (вдоль оси  $Y$ ) перемещение без трения тел 1 и 2.

К телу 1 прикладывается вынуждающая сила  $F(t)$ , определяемая по формуле:

$$F(t) = A_0 \omega_{ак}^2 m_1 \cos \omega_{ак} t, \quad (1)$$

где  $A_0$  – амплитуда подаваемых на ось ультразвуковых колебаний;  $\omega_{ак} = 2\pi f$  – их круговая частота;  $f$  – частота подаваемых на ось ультразвуковых колебаний.

В результате действия силы тело 1 совершает вынужденные перемещения в вертикальном направлении в пределах внутреннего отверстия кольца 2.

Предлагаемая модель близка к моделям ускорения Ферми, рассматриваемым в работе [9]. Однако в отличие от них, в данной модели исследуется характер движения двух тел, обеспечиваемый как за счет приложения периодической вынуждающей силы к одному из контактирующих тел, так и в результате взаимных соударений тел друг с другом, а также с поверхностью жесткого основания.

Так как перемещения тел в модели предполагаются только вдоль вертикальной оси и их удары

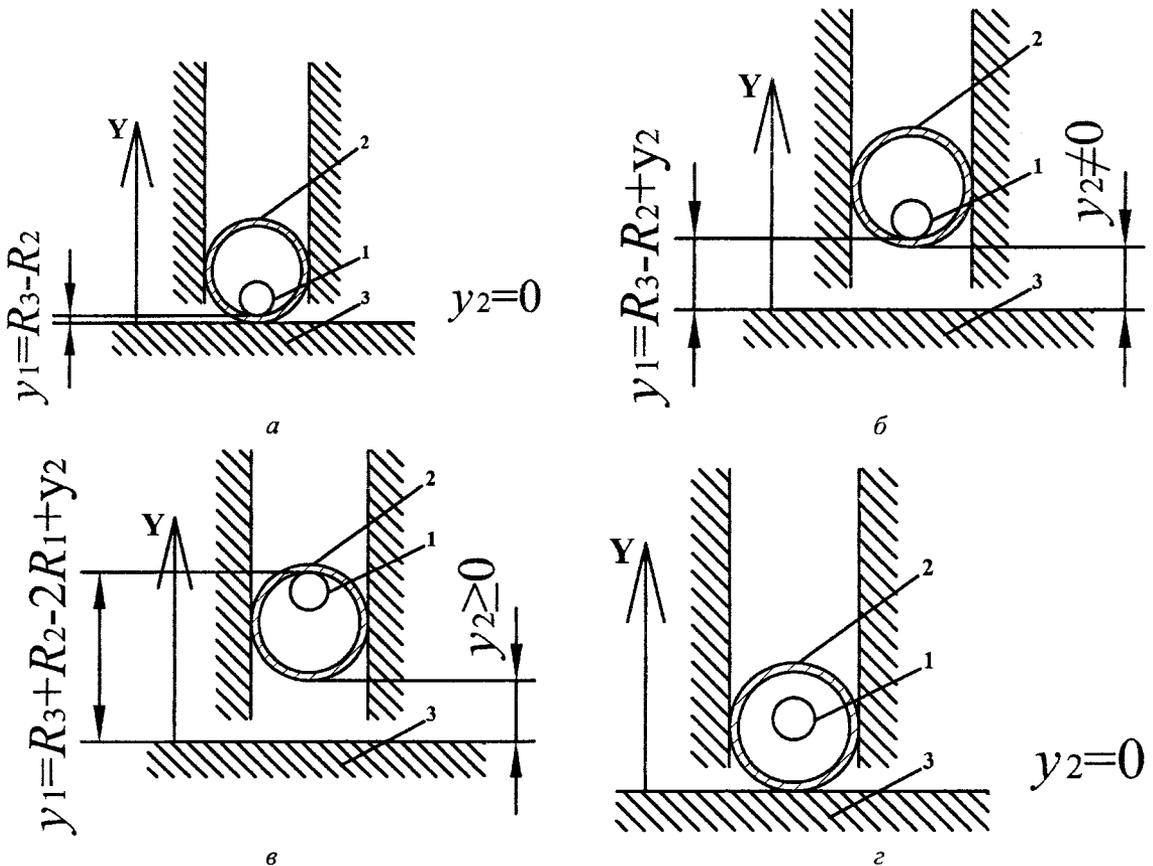


Рис. 3. Возможные типы соударений в принятой модели

предполагаются центральными, то трения между ними в момент ударов не происходит. Также тела считаются абсолютно жесткими, а соударения тел 1 и 2 друг о друга, а также удар тела 2 о неподвижное основание 3 предполагаются мгновенными. Данное предположение является оправданным, т.к., согласно [10], применение модели Ньютона, принятой в данной статье, дает схожие значения, как и при использовании теории Герца. Такие допущения позволяют исследовать характер движения тел 1 и 2 в промежутках между столкновениями, пропуская непосредственно сам момент удара. Это дает возможность применять метод приспособывания, с учетом того, что изменение скоростей соударяющихся тел происходит при условии сохранения импульса в системе согласно формулам, приведенным в работе [11]. Работа, затрачиваемая на пластические деформации твердых тел, а также потери энергии в результате соударений учитывались за счет применения коэффициентов восстановления скорости. Так при соударениях тел 1 и 2 коэффициент восстановления принимался равным  $K = 0,6$ , а при соударении тела 2 о неподвижное основание 3 использовался коэффициент восстановления скорости  $K_1 = 0,4$ . Выбор таких значений, согласно [11], соответствуют соударениям деталей из бронзы, а меньшее значение деталям из свинца в широком диапазоне скоростей точек контакта при ударе.

В качестве вертикальной координаты тела 1,

принималось расстояние между нижней точкой сферы 1 и ближайшей к ней точкой основания 3, отмеренной по вертикали. Аналогично, координатой тела 2 для удобства отображения получаемой информации, считалось расстояние между нижней точкой кольца 2 и основанием 3.

Для использования метода приспособывания авторами предварительно были выделены возможные типы соударений в системе, показанные на рис. 3.

В качестве первого типа удара (рис. 3, а) принималась ситуация, при которой возникал одновременный контакт сферы 1 с нижней частью внутреннего отверстия в кольце 2, при одновременном контакте кольца 2 с поверхностью основания 3. Второй вид столкновений в системе (рис. 3, б) происходил при контакте сферы 1 с нижней частью внутреннего отверстия в кольце 2, при этом последнее не находилось в контакте с неподвижным основанием. В качестве третьего типа соударений (рис. 3, в) авторами выделялся контакт сферы 1 с верхней частью внутреннего отверстия кольца 2, не находящегося в соприкосновении с неподвижным основанием 3. При четвертом типе соударений (рис. 3, г) происходил контакт кольца 2 с неподвижным основанием 3, при одновременном отсутствии соударений сферы 1 с внутренними стенками кольца 2. Значения координат  $y_1$  и  $y_2$  или их диапазоны изменений для сферы 1 и кольца 2 при каждом из выделенных типов соударений

в системе также приведены на рис. 3.

При этом свободное (в промежутке между ударами) движение твердых тел модели описывается системой уравнений (2):

$$\begin{cases} m_1 \ddot{y}_1 = -m_1 g + F(t); \\ m_2 \ddot{y}_2 = -m_2 g. \end{cases} \quad (2)$$

Исследование характера движения для взаимно соударяющихся тел потребовало разработки программного кода в среде Mathcad, при котором, в каждом промежутке времени между соударениями производилось численное решение системы уравнений (2) при помощи метода Рунге-Кутты с начальными условиями, соответствующими положению тел системы, приведенному на рис. 3, а, что являлось первым циклом движения тел. Число шагов, на которых находилось решение, принималось равным 10000, а промежуток времени расчета составлял 1 с. Выбор таких параметров позволил выполнять исследование характера движения тел с временной дискретизацией, составлявшей 0,0001 с. При этом для реализации метода припасовывания с помощью разработанного программного кода производился поиск продолжительности свободного без соударений движения тел 1 и 2 до наступления каждого из возможных столкновений в системе. Для этого в полученной, в результате численного решения, матрице перемещений и скоростей тела 1 и 2 производился поиск координат, удовлетворяющих условиям, приведенным на рис. 3. В качестве продолжительности цикла свободного движения принимался промежуток времени до ближайшего из возможных столкновений. Затем цикл расчета свободного движения тел задаваемого системой уравнений (2), повторялся, при этом начальные условия для расчета изменялись в соответствии с типом возникающего соударения.

Для соударения первого типа начальные условия определялись формулами:

$$\begin{aligned} y_{1n+1} &= R_3 - R_2; \quad y_{2n+1} = 0; \\ y'_{1n+1} &= \frac{(m_1 - Km_2)y'_{1n} + (1+K)m_2 y'_{2n}}{(m_1 + m_2)}; \\ y'_{2n+1} &= -K_1 \frac{m_1(1+K)y'_{1n} + (m_2 - Km_1)y'_{2n}}{(m_1 + m_2)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Для соударения второго типа начальные условия определялись формулами:

$$\begin{aligned} y_{1n+1} &= y_{2n} + R_3 - R_2; \quad y_{2n+1} = y_{2n}; \\ y'_{1n+1} &= \frac{(m_1 - Km_2)y'_{1n} + (1+K)m_2 y'_{2n}}{(m_1 + m_2)}; \\ y'_{2n+1} &= \frac{m_1(1+K)y'_{1n} + (m_2 - Km_1)y'_{2n}}{(m_1 + m_2)}. \end{aligned} \quad (4)$$

Для соударения третьего типа начальные условия определялись формулами:

$$\begin{aligned} y_{1n+1} &= y_{2n} + R_3 + R_2 - 2R_1; \quad y_{2n+1} = y_{2n}; \\ y'_{1n+1} &= \frac{(m_1 - Km_2)y'_{1n} + (1+K)m_2 y'_{2n}}{(m_1 + m_2)}; \\ y'_{2n+1} &= \frac{m_1(1+K)y'_{1n} + (m_2 - Km_1)y'_{2n}}{(m_1 + m_2)}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для соударения четвертого типа начальные условия определялись формулами:

$$\begin{aligned} y_{1n+1} &= y_{1n}; \quad y_{2n+1} = 0; \\ y'_{1n+1} &= y'_{1n}; \\ y'_{2n+1} &= -K_1 y'_{2n}; \end{aligned} \quad (6)$$

где  $y_{1n+1}$ ,  $y_{1n}$  – соответственно координата тела 1 после и до соударения;  $y_{2n+1}$ ,  $y_{2n}$  – соответственно координата тела 2 после и до соударения;  $y'_{1n+1}$ ,  $y'_{1n}$  – соответственно скорость тела 1 после и до соударения;  $y'_{2n+1}$ ,  $y'_{2n}$  – соответственно скорость тела 2 после и до соударения.

В каждом последующем цикле вычислений, соответствующем свободному движению тел 1 и 2 между соударениями, в полученной матрице численного решения системы уравнений (2) выделялась подматрица, соответствующая движению тел 1 и 2 до ближайшего из возможных соударений. Затем с помощью программного кода производилось очередное численное решение системы (2), но уже с другими начальными условиями, определенными в соответствии с формулами (3)–(6).

При этом программным модулем предусматривалось параллельное решение двух систем уравнений (2). Это позволяло учесть непрерывность изменения во времени вынуждающей силы  $F(t)$ , действующей на тело 1, за счет добавления к начальному и конечному отрезку времени нахождения численного решения системы (2), временного сдвига, обеспечивающего суммирование продолжительности всех вычисленных ранее циклов свободного (без соударений) движения тел. Учет временного сдвига выполнялся для тела 1, а решение системы уравнений (2) от 0 до 1 производилось для тела 2. Для последующего анализа на возможные соударения программному коду передавалась матрица, составленная из соответствующих матриц, полученных параллельным решением системы (2) с учетом и без учета временного сдвига. Далее после нахождения продолжительности свободного движения тел цикл вычислений повторялся. Выделенная на каждом цикле подматрица объединялась с матрицей, суммирующей предыдущие этапы циклов свободного движения систем, в результате чего получалась матрица, содержащая значения координат и ско-

ростей тел 1 и 2 системы с временной дискредитацией, составляющей 0,0001 с. Общее количество циклов в программном коде ограничивалось 500, что позволяло наблюдать, в зависимости от различных значений частоты и амплитуды вынужденных колебаний, массы тел, коэффициентов восстановления скорости характер движения тел в системе на временном промежутке до 2–3 с.

**Результаты исследований и их обсуждение**

На рис. 4 представлены траектории движения

тел системы в условиях нулевого зазора между телом 1 и телом 2 при различных значениях амплитуды вынужденных колебаний (для удобства сравнения на графиках показаны траектории движения в промежутке времени от 0 до 0,02 с с соблюдением одинакового масштаба отображения изменения координат тел при разных частотах).

Как видно из рис. 4, характер движения тел 1 и 2 системы при их взаимодействии с нулевым зазором представляет собой совокупность циклов отрыва тела 2 от основания 3 на постепенно уве-

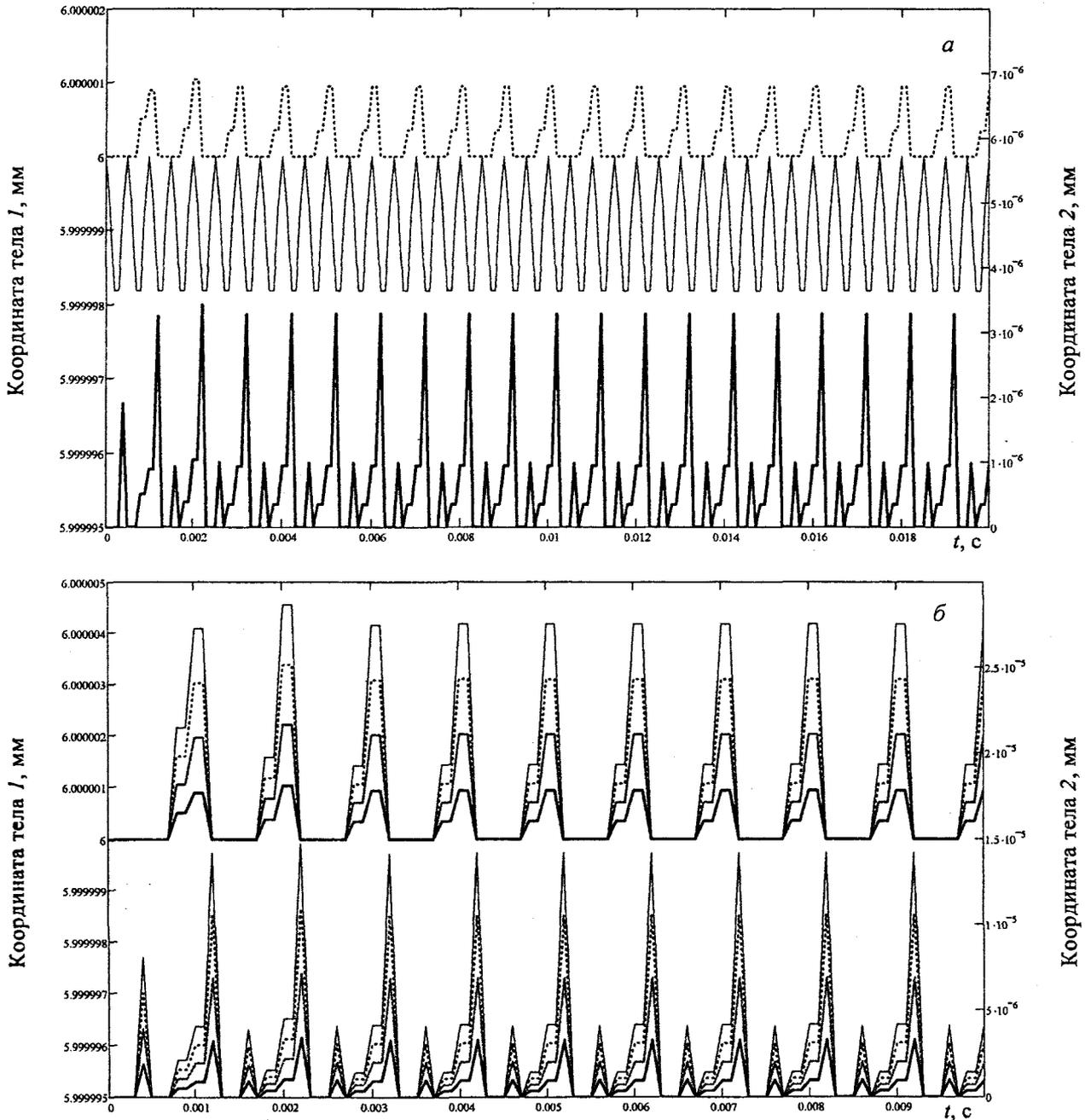
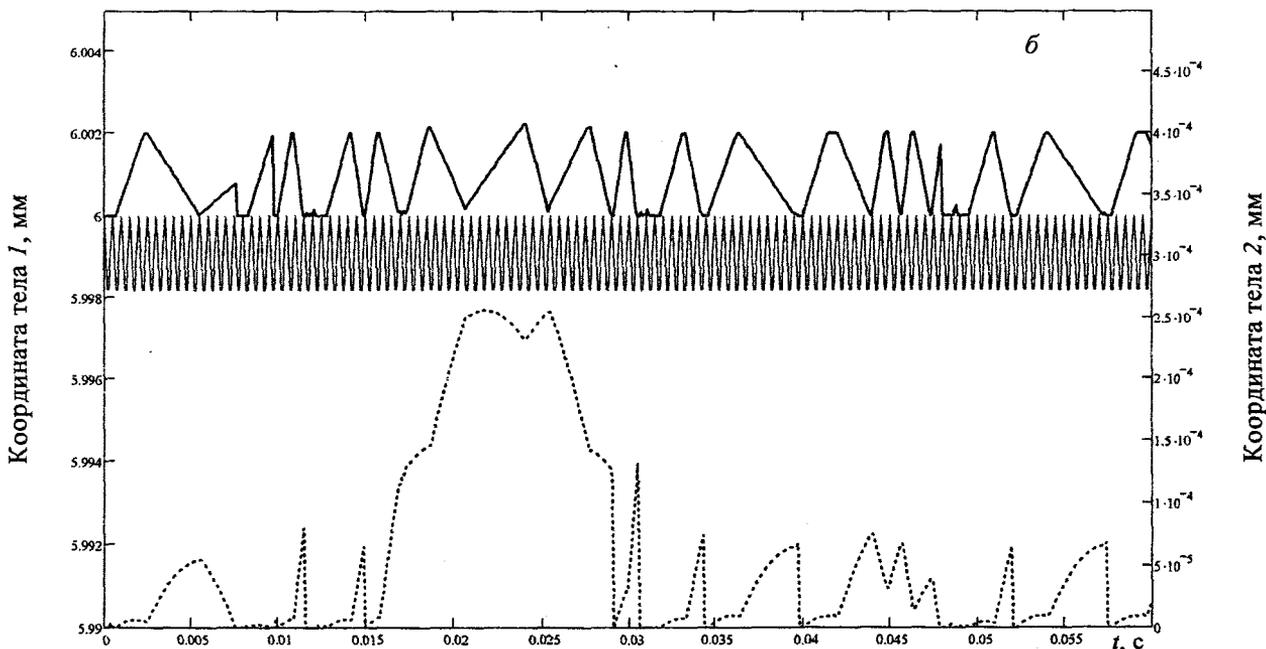
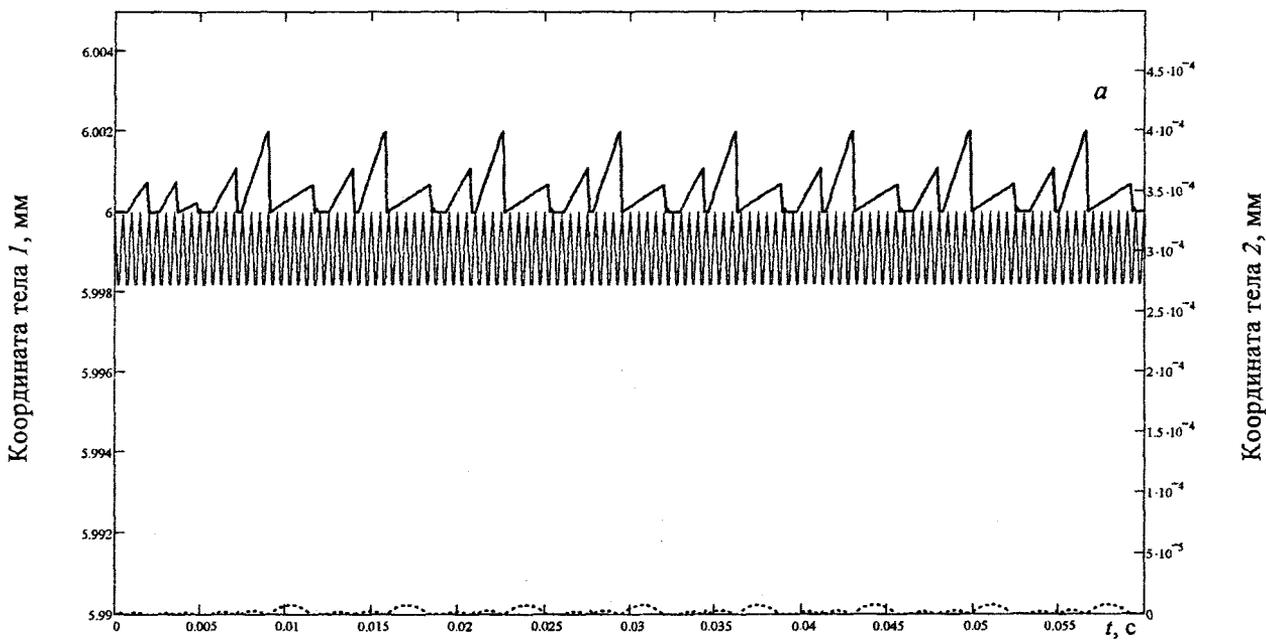


Рис. 4. Расчетные траектории изменения во времени положения тел 1 и 2 в условиях нулевого зазора между телами ( $m_1 = 0,5$  кг;  $m_2 = 25$  кг;  $K = 0,6$ ;  $K_1 = 0,4$ ;  $f = 22000$  Гц): *a* – при амплитуде вынужденных колебаний  $A_0 = 5$  мкм (черная штриховая линия – координата тела 1; черная сплошная линия – координата тела 2; серая тонкая – условно показанное изменение во времени вынуждающей силы  $F(t)$ ); *b* – при различных амплитудах вынужденных колебаний: вверху координаты тела 1; внизу – координаты тела 2 (черная сплошная жирная линия –  $A_0 = 5$  мкм, серая тонкая линия –  $A_0 = 10$  мкм; черная штриховая линия –  $A_0 = 15$  мкм; черная сплошная тонкая линия –  $A_0 = 20$  мкм)

личивающуюся высоту и последующего соударения с основанием, т.е. иллюстрирует эффект «затягивания» подвижного тела в разомкнутой акустической колебательной системе с последующим срывом с него. Как показал анализ полученных данных, начальный выход на данный режим происходит следующим образом. При нахождении тела в начальном положении в начальный момент времени вынуждающая сила  $F(t)$  начинает уменьшаться, в промежуток времени, когда она достигает своего минимального значения и направлена к основанию, происходит передача силового воздействия на нижнюю стенку отверстия тела 2 (столкновение первого типа), в результате которого оно приобретает скорость, направленную вертикально вверх от

основания 3. При этом вертикально направленная сила  $F(t)$  препятствует одновременному подъему тел 1 и 2 от основания 3, т.е. в следующий момент времени снова происходит столкновение первого типа. При этом в данный момент времени сила  $F(t)$  принимает свое максимальное значение, что вместе со столкновением тела 1 с нижней стенкой отверстия тела 2 обеспечивает значительную по величине и направленную вертикально вверх скорость, что позволяет телу 1 оторваться от нижней стенки отверстия тела 2, которое в свою очередь при столкновении первого типа получает возможность подняться над основанием 3. При этом в процессе отрыва тела 2 от основания 3 дважды подряд реализуется передача импульсного воз-



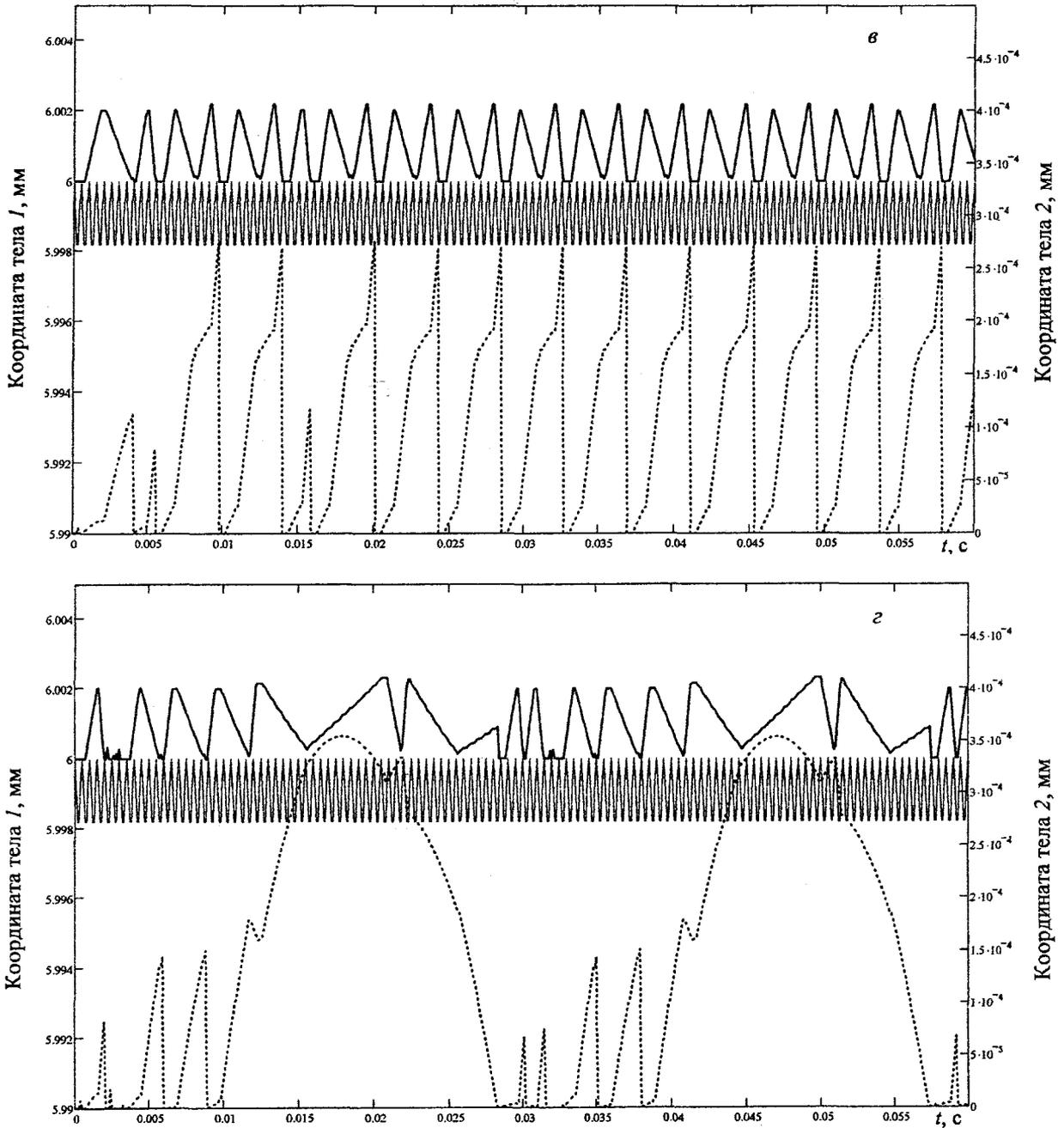


Рис. 5. Расчетные траектории изменения во времени от 0 до 0,06 с положения тел 1 и 2 (при одинаковом масштабе увеличения) в условиях зазора между телами  $\Delta = 2$  мкм ( $m_1 = 0,5$  кг;  $m_2 = 25$  кг;  $K = 0,6$ ;  $K_1 = 0,4$ ;  $f = 22000$  Гц) при различных амплитудах вынужденных колебаний: а -  $A_0 = 5$  мкм; б -  $A_0 = 10$  мкм; в -  $A_0 = 15$  мкм; г -  $A_0 = 20$  мкм

действия на верхнюю стенку отверстия в теле 2 (столкновение третьего типа). Первое из этих столкновений связано с моментом, когда сила  $F(t)$  начинает возрастать от своего минимального значения, а второе совпадает с моментом, когда сила  $F(t)$  максимальна по своей величине. Такое двойное столкновение подряд обеспечивает подъем тела 2 на высоту порядка  $3,5$  мкм от основания. При этом направление действия силы  $F(t)$  изменяется, и тело 1 стремится переместиться вниз. Поэтому высота подъема ограничивается последующей передачей силового воздействия на нижнюю стенку отверстия тела 2 телом 1 (столкновение первого типа), в результате чего тело 2 прижима-

ется телом 1 к основанию 3, что обеспечивает в следующий момент времени отрыв тела 2, после чего цикл движения повторяется. При этом продолжительность циклов таких затягиваний и срывов равно тройному периоду изменения силы  $F(t)$ . Увеличение амплитуды ультразвукового возбуждения не меняет характера взаимодействия тел, однако увеличенное силовое воздействие обеспечивает увеличение высоты подъема тела 2 над основанием 3 (рис. 4, б), не изменяя продолжительности цикла взаимодействия.

Как видно (рис. 5) при наличии зазора между телами 1 и 2 происходит существенное различие траекторий их движения при разных уровнях

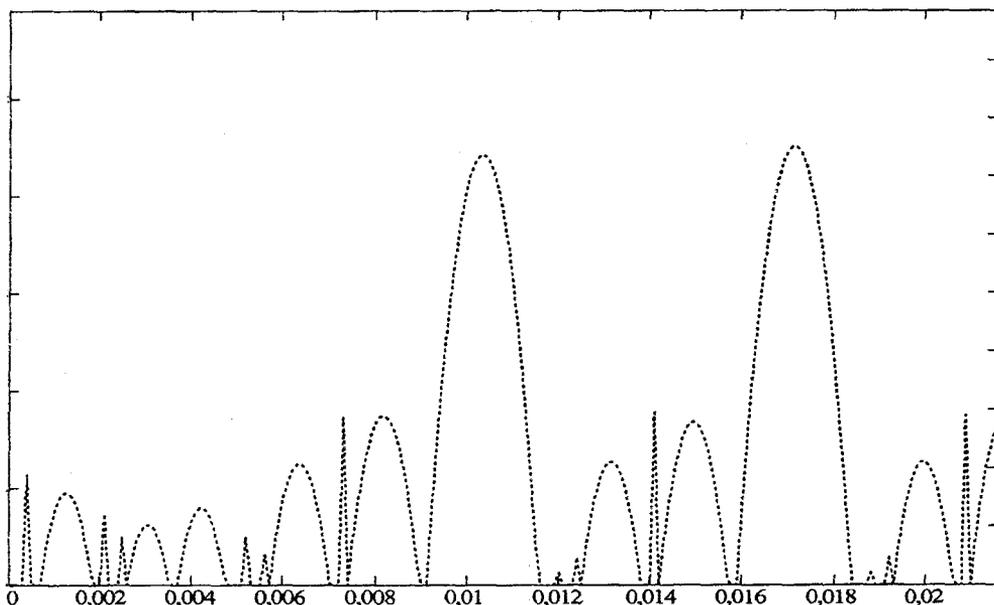


Рис. 6. Расчетная траектория изменения во времени от 0 до 0,06 с положения тела 2 (при одинаковом масштабе увеличения) в условиях зазора между телами  $\Delta = 2$  мкм ( $m_1 = 0,5$  кг;  $m_2 = 25$  кг;  $K = 0,6$ ;  $K_1 = 0,4$ ;  $f = 22000$  Гц) при амплитуде ультразвуковых колебаний  $A_0 = 5$  мкм

ультразвукового возбуждения. При этом необходимо отметить, что особенностью движения тела 2 является совокупность параболических или пилообразных траекторий, описывающих отскок тела 2 от основания 3 и его последующее движение к нему под действием силы тяжести (параболические участки) или за счет следующего соударения в системе (пилообразные участки). При этом параметры параболических участков (высота отскока, а также продолжительность свободного движения) в начале взаимодействия тел системы характеризуются хаотичностью их изменения. При этом изменение амплитуды ультразвукового возбуждения приводит к тому, что после непродолжительного периода начального хаотического взаимодействия возникают либо закономерно повторяющиеся соударения тела 2 с основанием 3 и его возврат под действием силы тяжести (рис. 5, а), либо отскок тела 2 от основания 3 и его возврат за счет соударения с телом 1 (рис. 5, в), либо сложное движение тела 2 относительно основания (рис. 5, б, г), характеризующееся наличием как пилообразных участков отскока с последующим возвращением за счет соударения с телом 1, так и продолжительных подъемов тела 2 с соударениями внутри него, приводящих к появлению зазубрин на траекториях движения или изменению кривизны их траектории. При этом уровень ультразвукового возбуждения системы непосредственно влияет на характер движения тела 1 в зазоре отверстия тела 2. Так, при малой амплитуде вынужденных колебаний (рис. 5, а) при начальном хаотическом движении наблюдаются соударения первого и четвертого типа, что тело 1 соударяется только с нижней стенкой отверстия в теле 2, приводя к постепенной его раскатке, и

только после ряда циклов происходит соударение с верхней стенкой отверстия тела 2 (соударение третьего типа) приводя к повышению высоты отрыва тела 2 от основания 3. При этом характер взаимодействия тел в системы носит циклический характер и состоит из ряда циклов соударений системы, заканчивающихся максимальным подъемом тела 2 (рис. 6).

С повышением уровня ультразвукового возбуждения системы происходит изменение характера движения тела 1. Так, уже при  $A_0 = 10$  мкм в системе начинают преобладать чередующиеся столкновения второго и третьего типа (рис. 5, б), т.е. реализуется движение тела 1 от нижней к верхней стенке отверстия в теле 2 и назад. Такое движение приводит к повышению уровня отрыва тела 2 от основания, что иллюстрируется на рис. 5, в, где тело 1 практически всегда перемещается от нижней стенки к верхней, приводя к возникновению устойчивых периодически повторяющихся циклов подъема тела 2 над основанием. Дальнейшее повышение амплитуды вынуждающей силы  $F(t)$  приводит к реализации процесса постепенной раскатки тела 2, в результате которого происходит постепенное повышение высоты подъема на основании 3, после чего возникает продолжительный отрыв от основания, сопровождающийся столкновениями второго и третьего типа внутри него.

Как видно из рис. 7, увеличение зазора до 4 мкм между телами приводит к изменению характера их движения, кроме случая, когда амплитуда вынужденных колебаний  $A_0 = 5$  мкм, при котором характер движения тела не изменяется. При этом повышение уровня ультразвукового воздействия на элементы системы приводит к увеличе-

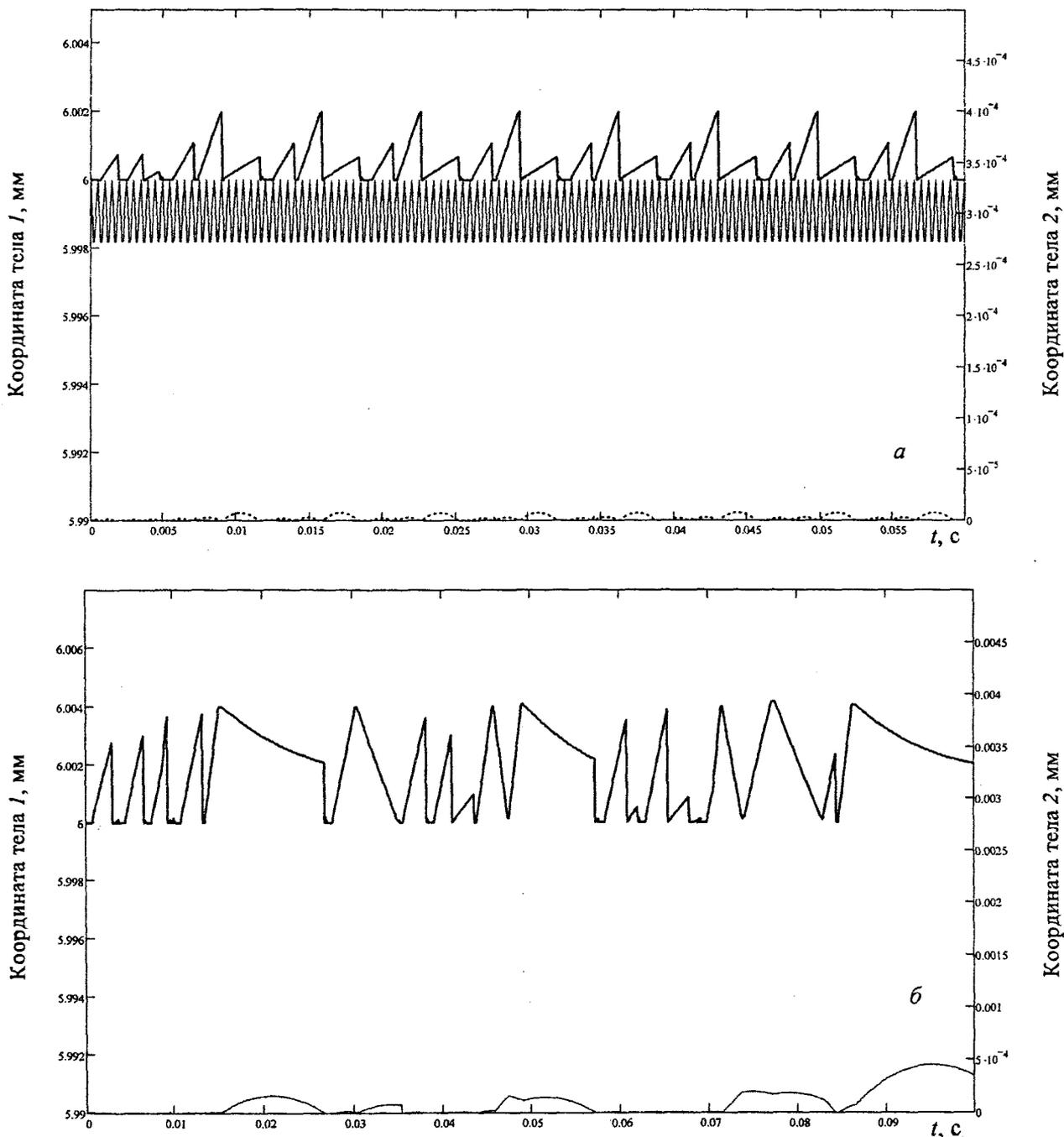
нию как высоты подъема тела 2 над основанием, так и продолжительности этих циклов. При этом повышение уровня подъема тела 2 над основанием обеспечивается при наступлении в системе соударения третьего типа. В случае наступления соударений других типов траектория движения тела 2 имеет вид, близкий к приведенному на рис. 6. Таким образом, особенностью движения тела 2 является наличие участков, где тело 2 отрывается от основания на повышенную величину (рис. 8, а), после чего движется по траектории (рис. 8, б), которая по характеру напоминает траекторию, приведенную на рис. 6.

Таким образом, увеличение зазора между те-

лами приводит к уменьшению вероятности столкновений третьего типа в системе и повышенного подъема тела 2 над основанием 3. Очевидно, что при определенных критических значениях зазора  $\Delta_{\text{крит}}$  происходит прекращение ударов тела 1 о верхнюю стенку отверстия тела 2, в результате чего не наблюдается изменений в характере движения тел системы при дальнейшем увеличении зазора.

На рис. 9 показано изменение величины критического зазора  $\Delta_{\text{крит}}$  в зависимости от уровня ультразвукового возбуждения в системе.

Из рис. 9 видно, что с увеличением амплитуды  $A_0$  в диапазоне 5–15 мкм происходит ускорен-



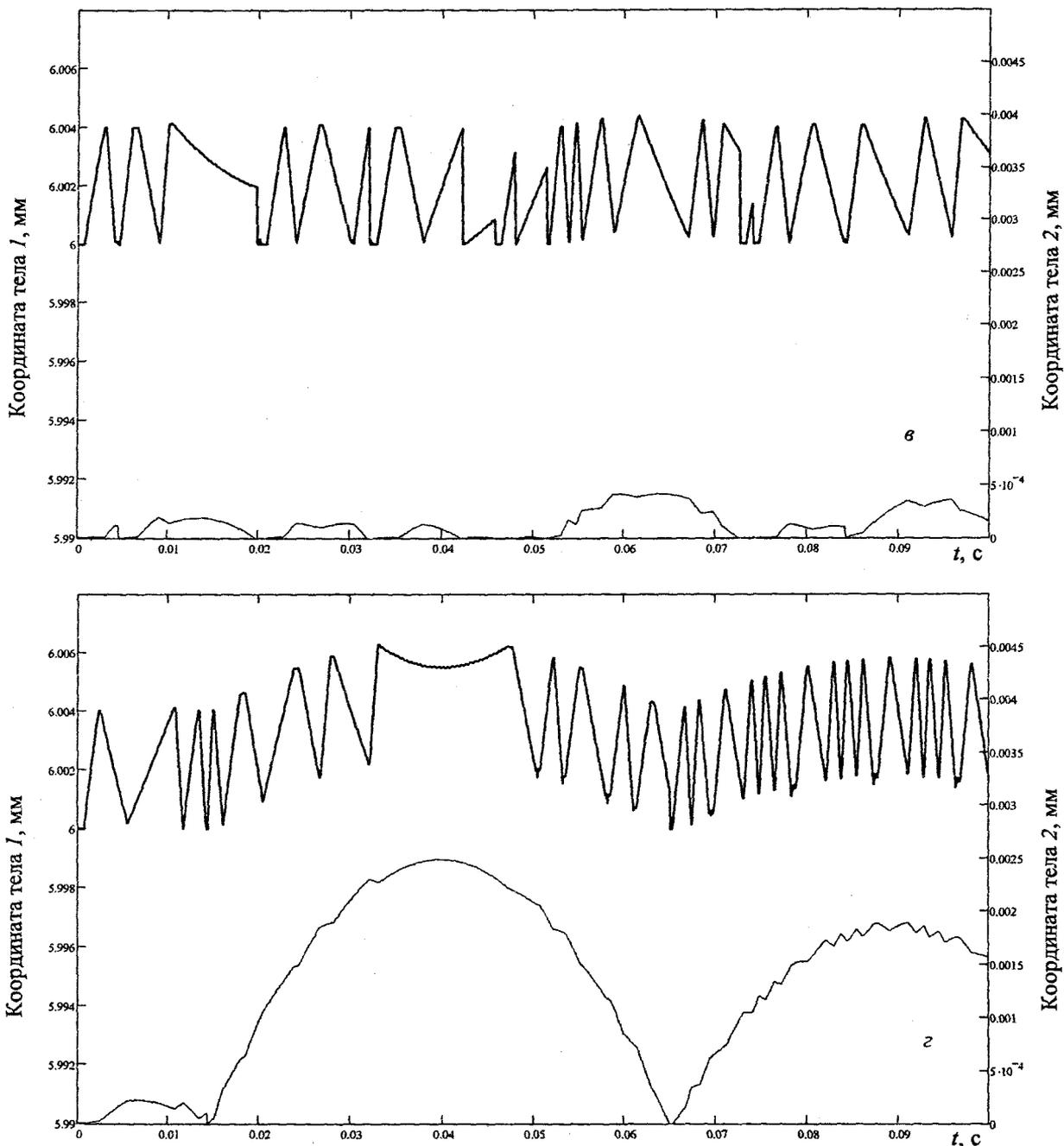


Рис. 7. Расчетные траектории изменения во времени от 0 до 0,1 с положения тел 1 и 2 (при одинаковом масштабе увеличения) в условиях зазора между телами  $\Delta = 4$  мкм ( $m_1 = 0,5$  кг,  $m_2 = 25$  кг,  $K = 0,6$ ,  $K_1 = 0,4$ ,  $f = 22000$  Гц) при различных амплитудах вынужденных колебаний: а -  $A_0 = 5$  мкм; б -  $A_0 = 10$  мкм; в -  $A_0 = 15$  мкм; г -  $A_0 = 20$  мкм

ный рост величины критического зазора  $\Delta_{\text{крит}}$ , а после 15 мкм его изменение менее значительно. Это связано с тем, что при малых величинах зазора происходит разгон не только за счет действия вынуждающей силы  $F(t)$ , но и за счет соударений тела 1, когда оно последовательно движется от стенки к стенке. При больших величинах зазора такое движение практически не реализуется, и рост размера критического зазора, обеспечиваемый только увеличением амплитуды  $A_0$ , замедляется.

На рис. 10 показаны траектории установившихся движений тела 2, случае превышения размера критического зазора.

Видно, что движение тела 2 при отсутствии в системе соударений третьего типа представляет собой ряд параболических участков отрыва на изменяющуюся высоту над основанием и его возвращения под действием силы тяжести, сопровождающихся участками отрыва от основания и его возвращения за счет соударения с телом 1. При этом, как показало разложение в спектр траектории его движения с помощью быстрого преобразования Фурье (рис. 11) при значениях амплитуды  $A_0$  вынужденных колебаний 5 и 10 мкм доминирующая частота (рис. 11, а, б) в спектре составляет около 300 Гц, а также имеется дополнительный пик в районе 100 Гц.

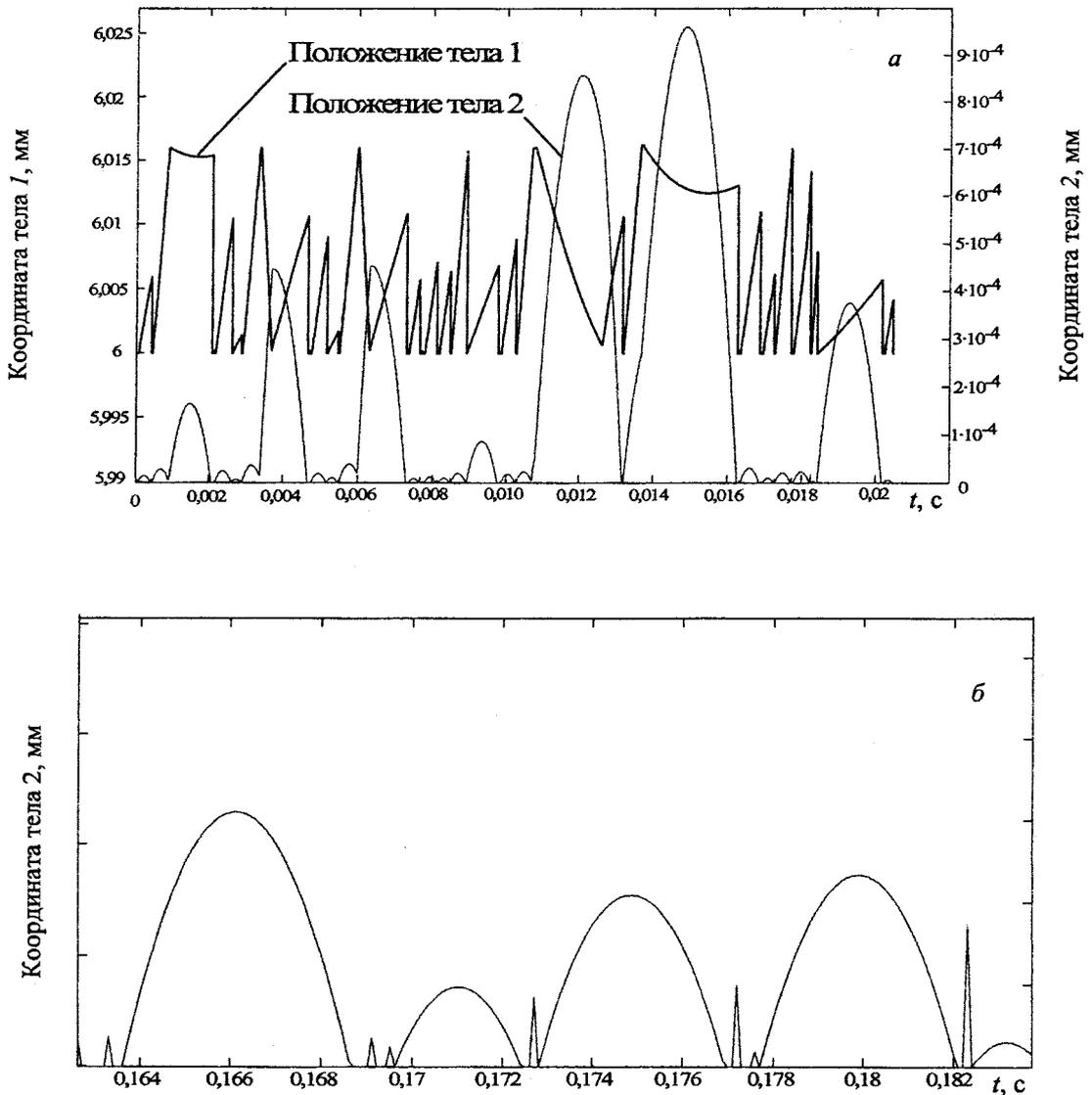


Рис. 8. Характер движения тела 2 в условиях зазора между телами  $\Delta = 16$  мкм ( $m_1 = 0,5$  кг;  $m_2 = 25$  кг;  $K = 0,6$ ;  $K_1 = 0,4$ ;  $f = 22000$  Гц;  $A_0 = 15$  мкм): а – расчетные траектории изменения тел 1 и 2 во времени от 0 до 0,2 с; б – фрагмент траектории тела 2, обеспечиваемый соударениями первого, второго и четвертого типов

При повышении амплитуды  $A_0$  основной пик смещается к значениям около 200 Гц, оставляя второй пик в районе 100 Гц.

В случае зазора меньшего  $\Delta_{крит}$ , разложение в спектр с помощью быстрого преобразования Фурье дает картину, аналогичную приведенной на



Рис. 9. Изменение критического зазора  $\Delta_{крит}$  при различной амплитуде  $A_0$  вынужденных колебаний

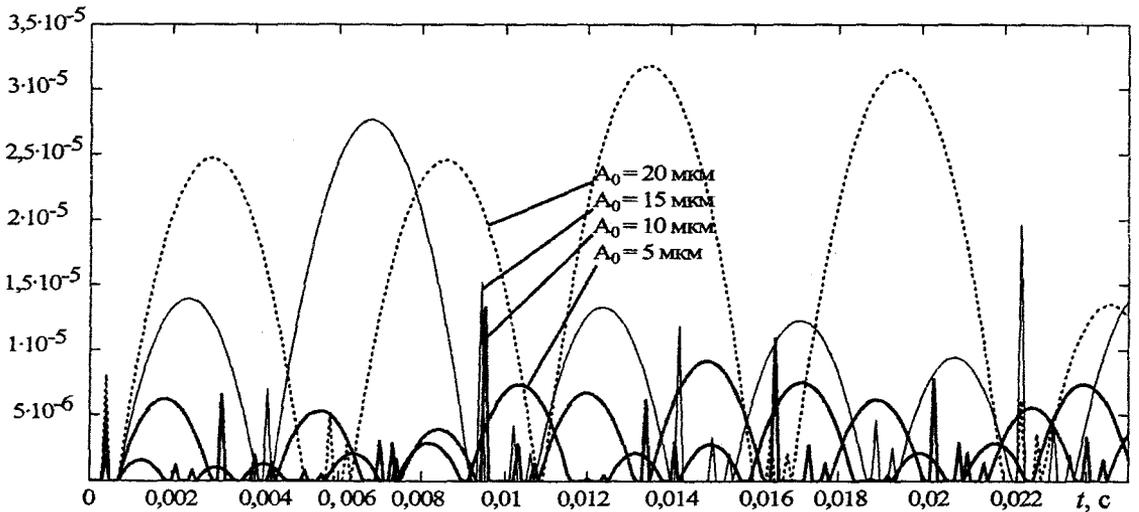


Рис. 10. Расчетные траектории изменения во времени от 0 до 0,025 с положения тела 2 в условиях превышения величины критического зазора  $\Delta_{\text{крит}}$  между телами ( $m_1 = 0,5$  кг;  $m_2 = 25$  кг;  $K = 0,6$ ;  $K_1 = 0,4$ ;  $f = 22000$  Гц) при различных амплитудах вынужденных колебаний: черная сплошная жирная линия –  $A_0 = 5$  мкм; серая толстая линия –  $A_0 = 10$  мкм; черная сплошная тонкая линия –  $A_0 = 15$  мкм; черная штриховая линия –  $A_0 = 20$  мкм)

рис. 12.

Видно, что при зазорах меньших  $\Delta_{\text{крит}}$  возникает широкий спектр частот, что, согласно [12],

позволяет судить о хаотическом характере движения данного тела, т.к. предложенная математическая модель имеет менее трех степеней свободы.

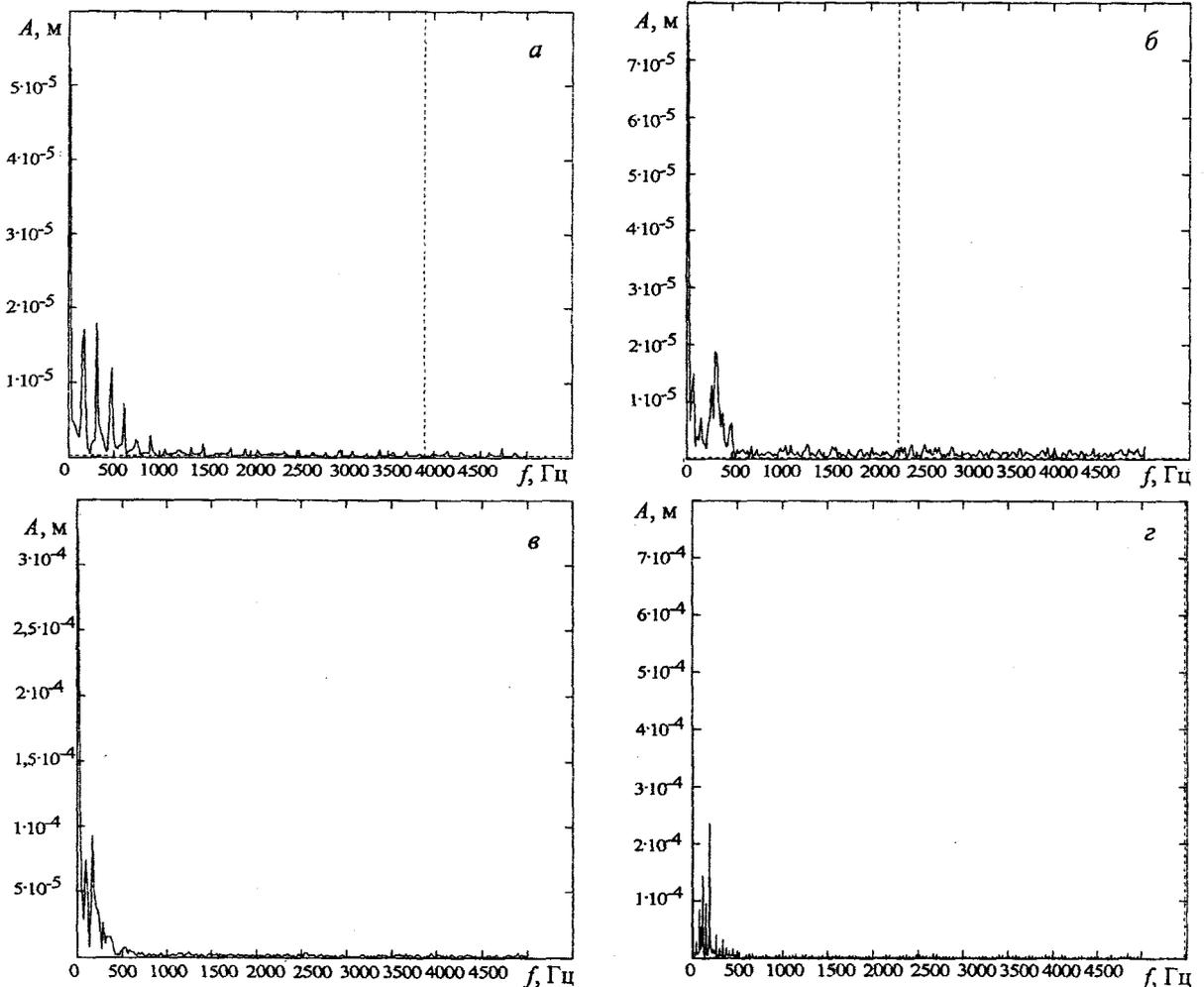


Рис. 11. Частотный спектр колебаний тела 2 в условиях превышения величины критического зазора  $\Delta_{\text{крит}}$  между телами ( $m_1 = 0,5$  кг;  $m_2 = 25$  кг;  $K = 0,6$ ;  $K_1 = 0,4$ ;  $f = 22000$  Гц) при различных амплитудах вынужденных колебаний: а –  $A_0 = 5$  мкм; б –  $A_0 = 10$  мкм; в –  $A_0 = 15$  мкм; г –  $A_0 = 20$  мкм

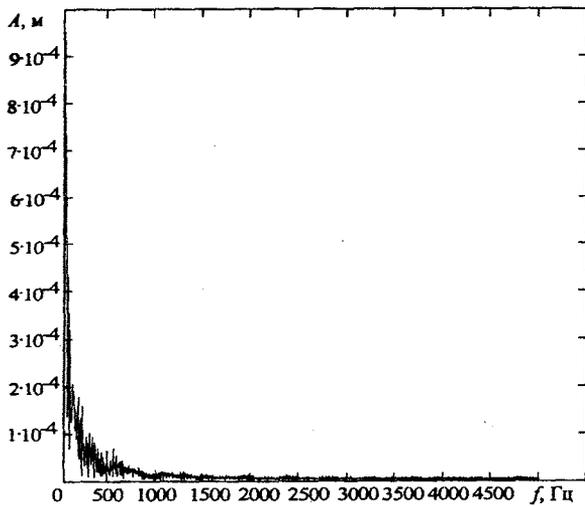


Рис. 12. Частотный спектр колебаний тела 2 в условиях зазора между телами  $\Delta = 4$  мкм ( $m_1 = 0,5$  кг;  $m_2 = 25$  кг;  $K = 0,6$ ;  $K_1 = 0,4$ ;  $f = 22000$  Гц;  $A_0 = 15$  мкм)

## Выводы

Обобщая результаты выполненных исследований, можно сформулировать следующие основные выводы:

1. Предложена расчетная схема взаимодействия элементов акустической колебательной системы с промежуточным подвижным звеном в виде тела качения, позволившая разработать математическую модель процесса движения подвижного звена при его контактировании с жестким основанием с учетом величины зазора в сопряжении накатной ролик – ось и интенсивности возбуждения системы.

2. С помощью разработанного в среде Mathcad программного кода, методом «припасовывания» проведено численное исследование разработанной математической модели, на основании которой выявлен характер движения промежуточного элемента при различных уровнях величины зазора и интенсивности ее ультразвукового возбуждения.

3. Установлено, что при нулевой величине зазора в сопряжении накатной ролик – ось взаимодействие звеньев системы представляет собой совокупность повторяющихся переходных процессов ее затягивания по амплитуде на виброударный режим взаимодействия накатного ролика с жестким основанием и последующего срыва с него. При этом с повышением интенсивности ультразвукового возбуждения характер движения звеньев не меняется, а лишь возрастает уровень их динамического взаимодействия.

4. Установлено, что величина зазора оказывает существенное влияние на временную эволюцию движения тел математической модели, причем характер данного движения является неустойчивым как по отношению к величине зазора, так и к интенсивности ультразвукового возбужде-

ния.

5. Установлено, что с превышением величины зазора некоторого критического значения  $\Delta_{\text{крит}}$ , зависящего от амплитуды вынужденных ультразвуковых колебаний (с ее увеличением происходит пропорциональное возрастание зазора), происходит стабилизация временной эволюции движения тел, при этом перемещение накатного ролика характеризуется циклами увеличивающихся по высоте отрывов его от основания, чередующихся срывом с виброударного режима взаимодействия.

6. На основании выявленных особенностей характера движения промежуточного элемента показано, что с технологической точки зрения оправданным является применение использование акустической колебательной системы с зазором в сопряжении накатной ролик – ось, превышающим величину критического зазора  $\Delta_{\text{крит}}$ , что позволяет получать прогнозируемые перемещения рабочего инструмента, в отличие от использования меньших по величине зазоров, где, как показал спектральный анализ, перемещение подвижного звена носит хаотический характер.

Работа выполнена в инициативном порядке.

## Обозначения

$P_{ст}$  – статическая нагрузка на промежуточный элемент акустической колебательной системы, Н;  $R_1$  – радиус твердого тела 1, м;  $m_1$  – масса твердого тела 1, кг;  $R_2$  – внутренний радиус твердого тела 2, м;  $R_3$  – внешний радиус твердого тела 2, м;  $m_2$  – масса твердого тела 2, кг;  $F(t)$  – вынуждающая сила, действующая в предложенной модели на твердое тело 1, Н;  $A_0$  – амплитуда ультразвуковых колебаний, м;  $f$  – частота ультразвуковых колебаний, Гц;  $\omega_{ак}$  – круговая частота ультразвуковых колебаний, рад/с;  $K$ ,  $K_1$  – коэффициенты восстановления скорости, соответственно при соударении тел 1 и 2 и при соударении тела 2 об неподвижное основание 3;  $\Delta = (R_2 - R_3)/2$  – величина зазора в отверстии телам 2 между ним и телом 1, м;  $\Delta_{\text{крит}}$  – критическая величина зазора в отверстии телам 2 между ним и телом 1, при превышении которой обеспечивается нечувствительность временной эволюции тела 2 по отношению к величине зазора, м.

## Литература

1. Киселев, М.Г. Исследование движения шариков в процессе доводки в поле ультразвуковых колебаний / М.Г. Киселев, М.Ю. Пикус, В.П. Луговой // Машиностроение. – 1979. – № 3. – С. 69–72.
2. Ящерицын, П.И. Исследование особенностей поведения шариков при их доводке в поле ультразвуковых колебаний / П.И. Ящерицын, М.Г. Киселев, В.П. Луговой, Г.А. Есьман // Изв. АН БССР. – Сер. физ.-техн. наук. – 1982. – № 1. – С. 116–118.
3. Киселев, М.Г. Интенсификация безэлеваторной доводки шариков с помощью ультразвука / М.Г. Киселев, Г.А. Есьман // Применение ультразвука в технологических процессах металлургического производства. – М., 1983. –

- С. 69–70.
4. Киселев, М.Г. Ультразвук в поверхностной обработке материалов / М.Г. Киселев, В.Т. Минченя, В.А. Ибрагимов; под ред. М.Г. Киселева. – Минск: Тесей, 2001. – 344 с.
  5. Киселев, М.Г. Повышение эксплуатационных показателей распиловочных дисков путем их ультразвуковой обработки / М.Г. Киселев, В.Т. Минченя, С.С. Савицкий // Алмазы и сверхтвердые материалы. – 1983. – № 12. – С. 5.
  6. Киселев, М.Г. Повышение эксплуатационных показателей распиловочных дисков путем их ультразвуковой обработки / М.Г. Киселев, В.Т. Минченя, С.С. Савицкий, Г.А. Василюк, Э.А. Марцинкевич // Алмазы и сверхтвердые материалы. – 1983. – № 12. – С. 5–6.
  7. Киселев, М.Г. Определение оптимальных режимов двустороннего шаржирования с ультразвуком боковых поверхностей распиловочных дисков по их абразивной способности / М.Г. Киселев, А.А. Новиков, Д.А. Степаненко // Вестник БНТУ. – 2005. – № 3. С. 34–39.
  8. Киселев, М.Г. Влияние ультразвукового воздействия на условия контактного взаимодействия накатного ролика с обрабатываемой поверхностью / М.Г. Киселев, А.В. Дроздов, В.Л. Габец, А.А. Столяров // Вестник ПГУ. – Серия «Промышленность. Прикладные науки». – 2009. – № 2. – С. 63–71.
  9. Лихтенберг, А. Регулярная и стохастическая динамика / А. Лихтенберг, М. Либман. – М.: Мир, 1984. – 536 с.
  10. Биндерман, В.Л. Теория механических колебаний: учеб. пособие для вузов / В.Л. Биндерман. – М.: Высш. школа, 1980. – 408 с.
  11. Курс теоретической механики: учеб. пособие для вузов / В.И. Дронг, В.В. Дубинин, М.М. Ильин [и др.]; под общ. ред. К.С. Колесникова. – 3-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 736 с.
  12. Мун, Ф. Хаотические колебания: вводный курс для научных сотрудников и инженеров; пер. с англ. / Ф. Мун. – М.: Мир, 1990. – 312 с.

Kiselev M. G. and Drozdov A. V.

**Theoretical estimation of the clearance's size influence of connection the roller – the axle on character of its interaction with the basis at ultrasonic system excitation.**

In the article theoretical research of influence of a roller–axis coupling gap size, and also a level of vibroimpulsive acoustic oscillatory system ultrasonic excitation on character of a mobile unit movement is carries out. Time evolutions of a vibroimpulsive systems units movement under various conditions of their interaction on the basis are received. It is shown, that a mobile unit movement character is change both in relation to gap size and to intensity of ultrasonic excitation, so the movement of acoustic oscillatory system elements is chaotic. During researches critical gap size, dependent on amplitude of the forced ultrasonic fluctuations at which excess there is a stabilization of time evolution of a mobile units is determined. It is shown, that in this case units movement is characterized by cycles increasing on it tearing height from the basis, alternate with breaking of vibroimpulsive interaction.

*Поступила в редакцию 28.09.2012.*

© М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, 2015.